

### אקראיות המשקעים ומחירי המים בארבע עונות גשם

שאלת אמינות ההספקה מלווה את כל השירותים הציבוריים; בכולם ההספקה אקראית, אף שבמדינות מסודרות הצרכנים נתקלים רק לעתים רחוקות בתקלות שמקורן באקראיות. בחשמל עיקר האקראיות נובע מתנודות בביקוש, במים התנודות העיקריות הן של המשקעים וההעשרה. מן הבחינה הכלכלית, שאלת האמינות היא עד כמה כדאי להשקיע בכדי להקטין מחסורים—תקופות בהן לא תהיה הספקה מלאה: שעות בחשמל שנים במים—ושאלה קשורה היא מה המחירים שמתאימים לשירות בו להספקה יש מרכיב אקראי. עניין המחירים אינו רק אקדמי; בין היטלי ההפקה שנקבעו לאחרונה בחוק יש כאלה שמשתנים לפי המצב ההידרולוגי, והוא אקראי: יכול להשתנות משנה לשנה. כן נקבע בהסכם עם החקלאים שהם יכסו עלות "מקורות"—עלות שמשקפת השקעות לא מעטות שנועדו להגברת אמינות. בימים אלה אנו מנסים ללמוד את שאלת האמינות והטיפול בה בדיון הכלכלי. כאן כוונתנו למסור ממה שלמדנו. במאמר קודם (גולדפרב, כסלו, 2007) דנו באמינות בקצרה; עתה אנו מבקשים להרחיב אף כי גם זאת נעשה בהנחות מפשטות. אנו מקווים שנצליח להסביר את היסודות ובמיוחד—להדגיש שאין תשובה יחידה לבעיית האקראיות ושבחירת הפתרון המתאים היא חלק ממדיניות משק המים. כרגיל, היישום למשק המים הישראלי יצריך עבודה מפורטת ומורכבת בהרבה.

ההצגה היא בעקבות מאמר של יעקב צור (Tsur, 1990) בו נבחנת הגברת אמינות ההספקה בעזרת הפקה ממאגר תת-קרקעי שמתווספת בשנים שחונות לתרומת המשקעים האקראיים. הדוגמה שלנו תהיה של מפעל התפלה שייבנה לעתודה ולתגבור; נניח שהמים משמשים בחקלאות ושאלות המאמר תהינה מה גודל מפעל ההתפלה ומה יהיו מחירי המים. בכדי לפשט, נניח שעשויים להיות ארבעה אירועים של משקעים: שנת בצורת, שנה שחונה, שנה גשומה ושנה עתירת גשמים. הגשם משקה את השדות, אין מאגרי מים ואין הפקה של מים טבעיים. אם הביקוש למים עולה על יבול הגשם, אפשר להפיק מים מותפלים ולהוסיפם לשדות. המשקעים הם ברכת השמים, ללא עלות. אנחנו חושבים על משק מים שיש בו חקלאים רבים והוא מנוהל בידי מתכנן לאומי. המתכנן מנסה להשיא (להביא למקסימום) את התרומה הכלכלית של משק המים—ערך התפוקה בחקלאות פחות עלות המים המותפלים. בהסתכלות מזווית אחרת, במשק המים שלושה מגזרים, ספקים, חקלאים ומשלמי מיסים—אותם מייצגת הממשלה (שמסבסדת במקרים מסוימים). המתכנן הלאומי משיא את סך התרומה הכלכלית לכל המגזרים גם יחד. על החלוקה ביניהם נעיר בהמשך. נוח להציג את המשק והתוכנית בדוגמה; למותר להדגיש שהיא שרירותית ונועדה רק להדגמה.

במשק של לוח 1 יש ארבעה אירועי גשם אפשריים ואנחנו מודדים אותם לא במ"מ אלא בכמות הגשם שפיזורה אחיד על שדות המשק: 1400 מ"ק, 1550, 1850, 2000 מ"ק; בממוצע 1700 מ"ק לשנה. האירועים מסומנים א, ב, ג, ד, אך זה לא בהכרח סדר הופעתם. ההסתברות לאירועים אחידה, 0.25: בכל שנה יש הסתברות של 25% שיתממש אחד מהאירועים, ללא קשר לשאלה מה היתה כמות הגשם בשנה הקודמת. עלות ההתפלה בדוגמה בנויה משני רכיבים: הראשון, עלות קבועה של 1.5 ש"ח למ"ק קיבולת לשנה (פחת, ריבית והוצאות קבועות אחרות). המפעל נושא בעלות זו בין אם יופעל או יובטל. הרכיב השני עלות משתנה של 1 ש"ח למ"ק מים מותפלים; עלות זו רובה ככולה עבור אנרגיה. הדיון נפתח בהנחה שגם המים המותפלים—כמו מי הגשם—

מסופקים לחקלאות באפס מחיר; למשל, תקציב המדינה מכסה את כל העלות, קבועה ומשתנה. הקצאת המים היא הקצאה מנהלית, לפי החלטת המתכנן. בהמשך נשלב מחירים שהחקלאים ישלמו תמורת המים.<sup>1</sup>

לוח 1: משק המים והחקלאות, הקצאה מנהלית

תפוקה שולית בחקלאות, ש"ח למ"ק	תפוקה בחקלאות, ש"ח	מים בחקלאות, מ"ק	התפלה, מ"ק	גשם, מ"ק	אירוע
7.00	79,388	1825	425	1400	א
1.00	79,388	1975	425	1550	ב
1.00	79,388	1975	125	1850	ג
-0.25	80,000	2000	0	2000	ד
2.20	78,958	1944	234	1700	ממוצע לשנה

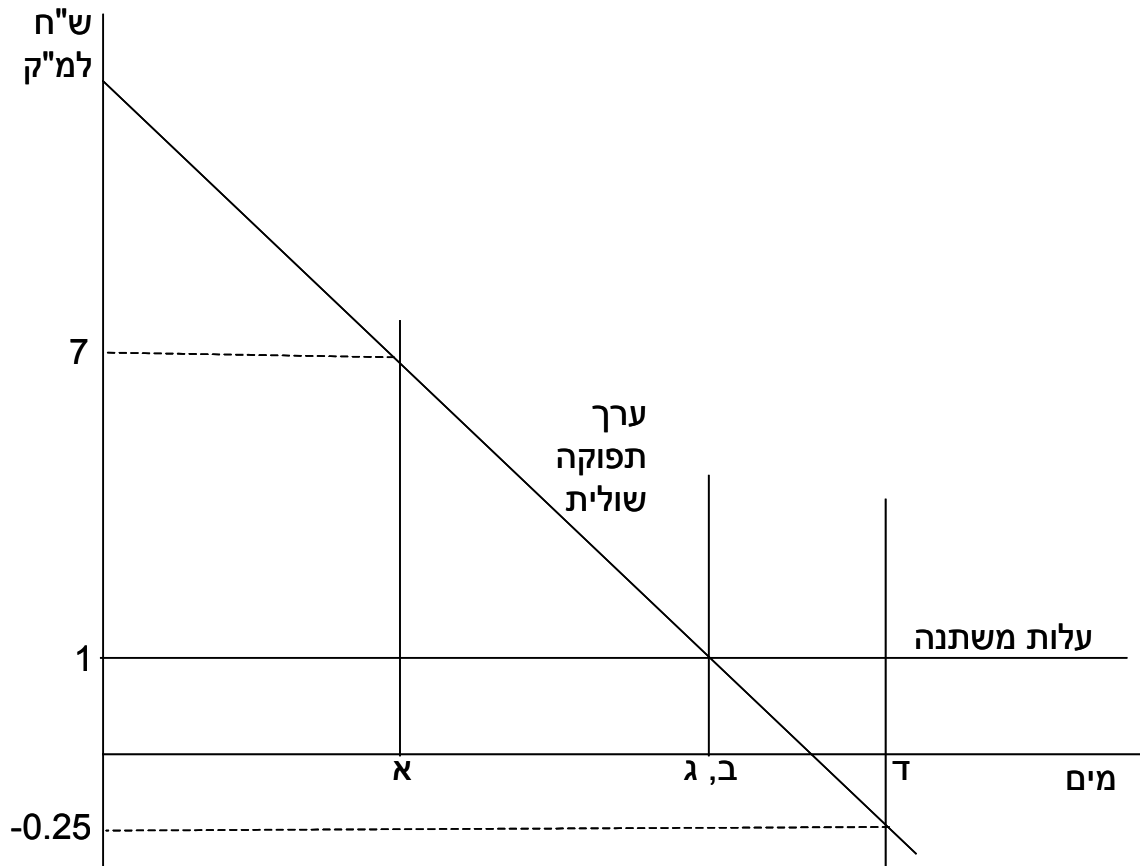
#### תוכנית ההפקה—הקצאה מנהלית

התפוקה בחקלאות היא פונקציה של כמות המים הכוללת—גשם והתפלה.<sup>2</sup> כאמור, מטרת המתכנן היא להשיא את התפוקה הנקייה של משק המים, ערך התפוקה בחקלאות פחות עלות המים. הוא יקצה את המים לחקלאים כך שערך זה יהיה מקסימלי. כיוון שהגשם אקראי, המתכנן משיא את תוחלת ההכנסה הנקייה; כלומר, הוא משיא את סכום ההכנסות הנקיות באירועים משוקללות בהסתברות לכל אירוע (הניסוח כללי, כאן השקלול מיותר מפני שההסתברויות זהות). התכנון המתמטי או של תוכנת המחשב קובע בעת ובעונה אחת הן את קיבולת מפעל ההתפלה והן את תוכנית ההפקה. אולם לצורך ההסבר נלך בשלבים: כאילו קודם הוחלט על כושר ההפקה של המפעל ואז נקבעה תוכנית הספקת המים—אותה נסביר למפעל נתון. בשלב שני נסביר את קביעת קיבולת ההתפלה. בדוגמה שבלוח ולפי התוכנית ייבנה מפעל התפלה בקיבולת של 425 מ"ק לשנה. המפעל יפיק מים מותפלים במלוא הקיבולת (כושר הייצור) אם יתממש אירוע א או יתממש אירוע ב; הוא יפיק 125 מ"ק בהתממש אירוע ג ויושבת ולא יופעל כלל אם יתממש אירוע ד.

נפתח בתוכנית ההפעלה, מה ההיגיון שמאחוריה? ההיגיון מתברר בהשוואת העלות המשתנה לערך התפוקה השולית של המים. העלות המשתנה היא כזכור 1 ש"ח למ"ק וכאשר המפעל קיים, זו גם העלות השולית של הספקת המים המותפלים. ערך התפוקה השולית הוא התוספת לתפוקה שתהיה בהוספת מ"ק אחד. למשל, באירוע ג (לוח 1), התוספת שמתקבלת לתפוקה במעבר מ-1974 ל-1975 מ"ק היא ש"ח אחד; זהה בערכה לעלות השולית. הוספת עוד מים לחקלאות תיצור תוספת תפוקה נמוכה בערכה מ-1 ש"ח למ"ק; כלומר, פחות מעלות ההפקה הנוספת. על כן באירוע ג לא כדאי להגדיל את כמות המותפלים מעבר ל-125 מ"ק. בהתממש אירוע ב ההפקה המיטבית תהיה 425 מ"ק, מלוא כושר המפעל. נוח להיעזר בהצגה גראפית.

<sup>1</sup> על הקצאה, מנהלית (במכסות) או במחירים, אפשר לקרוא אצל כסלו (2002).

<sup>2</sup> פונקציה ערך הייצור שנבחרה לדוגמה היא ריבועית  $Y = 80X - 0.02X^2$  ובה  $Y$  הוא ערך הייצור בשנה בש"ח ו- $X$  מסמל את כמות המים הכוללת במ"ק. ערך התפוקה השולית היא הנגזרת  $\partial Y / \partial X = 80 - 0.04X$ . ברצון נעביר למעוניינים את פרטי החישובים שסוכם בלוחות המאמר.



איור 1: ערך התפוקה השולית של המים ותוכנית הפקה

באיור 1 מסומנת כמות המים בחקלאות לכל אירוע; לא מסומנות בנפרד כמויות הגשם וההתפלה שמשתנות עם האירועים. באירועים ב ו-ג בכמות המים המסומנת (1975 מ"ק בלוח 1), ערך התפוקה השולית שווה לעלות המשתנה, 1 ש"ח למ"ק. אירוע א שבדוגמה הוא מקרה של בצורת חמורה. המפעל שנבנה יפיק במלוא הקיבולת, אך אילו היה נבנה מפעל גדול יותר, היתה גם ההתפלה רבה יותר. ערך התפוקה השולית, 7 ש"ח למ"ק, גדול בהרבה מהעלות המשתנה של הספקת המים המותפלים; בשנה כזו, אילו אפשר היה, כדאי היה מאוד להרחיב את ההתפלה. אבל גודל המפעל נתון.

מה יקרה בהתממש אירוע ד? במקרה זה כמות הגשם רבה כל כך שאין צורך במים מותפלים. המפעל יושבת באותה שנה. יתירה מזאת, לפי פונקציית הייצור שנבחרה, כמות הגשם רבה מדי, ערך התפוקה השולית של המים שלילי, -0.25 ש"ח למ"ק.

#### קיבולת מפעל ההתפלה

הקמת מפעל ההתפלה, אם מוצדקת, תוסיף להכנסה הנקייה של משק המים והחקלאות (נחשב בהמשך). עתה נראה שבהפעלה שמוצגת בלוח 1 מפעל בן 425 מ"ק הוא בגודל הנכון. בבחינת תוכנית הפקה השאלה היתה, האם כדאי (כאשר אפשר) להפיק "בשוליים" עוד מ"ק במפעל קיים? עתה השאלה השולית תהיה האם כדאי להרחיב את המפעל עצמו. בתנאי הדוגמה יש רק מקרה אחד שבו המפעל יפיק במלוא כושרו ועדיין יחסרו מים;

כלומר, ערך התפוקה השולית יהיה גבוה מהעלות המשתנה. דבר זה קורה בהתרחש אירוע א; אזי ההפקה היא 425 מ"ק וערך התפוקה השולית של המים הוא 7 ש"ח למ"ק. נוריד מזה עלויות משתנות, ונקבל שהתוספת לערך התפוקה השולית היא 6 ש"ח למ"ק (למעשה ערך זה הוא כאן "ערך הנדירות" שנקבע בגלל אילוץ היקף המפעל כמו שערך הנדירות במאגר נקבע בגלל אילוץ ההפקה המרבית המותרת). אירוע א מתרחש בממוצע אחת לארבע שנים. על כן בממוצע לשנה, ערך התפוקה השולית הנקייה (נקייה מהעלות המשתנה) של המים באירוע א הוא 1.5 ש"ח. שווה בגודלו לעלות.

האם כדאי לבנות מפעל גדול יותר? נסתכל על איור 1. אם נרחיב את המפעל נוכל לקבל כמויות מים נוספות; הרחבת המפעל תוסיף מים (רק באירוע א, באחרים כושר הייצור הנוסף לא ינוצל) אבל התרומה הממוצעת לשנה תהיה קטנה מ-1.5 ש"ח למ"ק. לא כדאי להרחיב. לעומת זאת, מפעל קטן יותר אינו מנצל את מלוא האפשרות לתרומה כלכלית. מפעל בכושר ייצור 425 מ"ק לשנה הוא מפעל בגודל הנכון. אפשר להציג זאת גם בצורה הבאה, ערך הנדירות מכסה את העלות הקבועה:

$$1.50 * 425 = 637.50 = 0.25 * 6.00 * 425$$

העלות הקבועה של המפעל היא 637.50 ש"ח לשנה ובממוצע גם המכפלה של ערך הנדירות בתפוקת המפעל בקיבולת מלאה היא 637.50 ש"ח לשנה.

עתה אפשר להבין את היגיון התוכנית של לוח 1. התוכנית הזו קבעה בעת ובעונה אחת הן את תוכנית ההפעלה והן את קיבולת המפעל כך שההכנסה הנקייה היא בשיאה (מקסימלית). בתוכנית הזו ערכי הנדירות מכסים את העלות הקבועה.

#### מחירים

עד כה לא שילבנו מחירים בדיון, ואכן, כפי שצוין, אפשר שיקום מפעל התפלה (או כל מפעל מים אחר) והמים יחולקו למשתמשים שלא תמורת כסף. מימון המפעל יבוא ממקורות אחרים (למשל, מימון הממשלה). ההקצאה תהיה מנהלית (במכסות); הקושי הוא להחליט על ההקצאה, מי יקבל את המים ומה תהיה הכמות בכל משק? מחירים יכולים לסייע בהקצאה. יתרונותיהם רבים: ההקצאה במחירים אינה אישית, כל חקלאי לוקח מים כפי שהוא מוצא לנכון; עם מחירים נמנעת האפשרות להעדפת מקורבים או אחרים; אפשר לחסוך את המנגנון המנהלי שמטפל בהקצאות האישיות; מחירים מוסרים למשתמשים במים מידע על עלותם למשק הלאומי; גביית המחירים מאפשרת צבירה של הסכומים הדרושים להמשך הספקת השירות—במקרה שלנו תפוקת ההתפלה. משטר מחירים פותח אפשרויות אך הוא אינו נטול בעיות; במיוחד, גביית המחירים עשויה להסיט את ההקצאה מן המיטבית. לביורור נציג כאן, בסיוע הדוגמה של לוח 1 והרחבתה, חמישה משטרי מחירים. בלוח 2 מוצג מידע מסכם; לקיצור איננו חוזרים על הפירוט של לוח 1 לכל משטר.

## לוח 2: מידע מסכם למשטרי מחירים

ערך התפוקה הנקייה ש"ח לשנה	עלות לחקלאים ש"ח לשנה	מחיר ש"ח למ"ק	תקופות מחסור	קיבולת המפעל מ"ק לשנה	משטר	
76,194	0	-	-	-	בעל	1.
78,958	0	-	1	425	הקצאה מנהלית	2.
					מחירים אחידים	
78,958	234	1	1	425	ללא כיסוי עלות קבועה	3.
78,900	813	4.04	1	408	עם כיסוי	4.
78,867	954	4.38	0	491	ללא מחסור	5.
78,958	872	- ,1 ,1 ,7	1	425	מחירים משתנים	6.

הערה: העלות לחקלאים וערך התפוקה, הם תוחלת המשתנים בשקלים מעוגלים.

השורה הראשונה בלוח 2 היא למשק בעל בו החקלאות ניזונה רק מגשמים, ללא כל התפלה. ההכנסה תהיה אז, 76,194 ש"ח לשנה בממוצע. מפעל התפלה, בשורה 2, יוסיף להכנסה הלאומית (נקייה מעלות ההתפלה) 2764 ש"ח בממוצע. זו תוספת חיובית ועל כן בנתוני הדוגמה מוצדק לבנות מפעל התפלה ולהשתמש במים שלו. בשלוש השורות, 3-5, מוצג התכנון למשטר של מחירים אחידים; כלומר, מחיר אחד לכל ארבעת האירועים. כזכור, מטרת התכנון היא להשיא את ההכנסה למשק המים—נקייה מעלות ההתפלה. בשורה 3 נקבע מחיר שלא בהכרח יכסה את מלוא עלות ההתפלה. המחיר הזה יהיה זהה לעלות המשתנה; כלומר, 1 ש"ח למ"ק. אם ייקבע המחיר הזה, ייקחו החקלאים בהתרחש אירועים ב ו-ג את הכמות המבוקשת, 1975 מ"ק מים, ובאירוע ד הם ימנעו מלקחת מים מותפלים; בהתרחש אירוע זה, הגשם הרב מצדיק השבתת המפעל. תקופת אירוע א, בצורת חמורה, היא תקופת מחסור בה המחיר אינו יכול לעשות את ההקצאה. בתקופה זו, גם אם המפעל יתפיל במלוא כושרו, יהיה מחסור במים וההקצאה תיעשה באמצעים מנהליים—הקצבות פרטניות. [אפשר גם לחשוב על הסדר אחר: לכל חקלאי תהיה מכסה, אך בדרך כלל הוא יוכל לרכוש מים כפי רצונו. בתקופת מחסור יוכל החקלאי לקבל שיעור מסוים מהמכסה; בדוגמה של לוח 1, 74% (כיוון שבמחיר של 1 ש"ח למ"ק החקלאים מבקשים, בהתרחש אירוע א, 575 מ"ק של מים מותפלים ועומדים לחלוקה רק 425). אך קביעת שיטת ההקצאה המנהלית חורגת מעניין הדיון הזה.]

חשוב לראות שעם גביית המחיר ששווה לעלות השולית של הספקת המים, כאן 1 ש"ח למ"ק, ההכנסה הנקייה של משק המים בשיאה, הגבוהה ביותר שאפשר להשיג (כמו בשורה 2). הממצא הזה הוא כללי; מחיר ששווה לעלות השולית של הספקת השירות מקצה את השירות (מים) באופן מיטבי. אולם, בדוגמה שלנו ובמקרים אחרים רבים, גביית מחיר זהה לעלות השולית לא תכסה את כל עלות ההתפלה; במיוחד, העלויות הקבועות לא תכסוה. (העלות הכוללת הממוצעת היא 821 ש"ח לשנה והגבייה הממוצעת היא 243 ש"ח לשנה.)

לתכנון שמוצג בשורה 4 הוספנו אילוף שהמחיר האחיד ייקבע כך שהפדיון ממכירת המים יכסה את כל עלות ההפקה. המחיר הזה יהיה 4.04 ש"ח למ"ק ומפעל ההתפלה שייבנה בתכנון עם האילוף הזה יהיה בקיבולת של 408 מ"ק לשנה. העלות לחקלאים—שהם יהיו אלה שיכסו עתה את כל העלות—תהיה 813 ש"ח לשנה בממוצע. בתכנון בשורות 2-4 מתקבל שבכל אחד מהמשטרים יהיה מחסור בהתרחש אירוע א; כלומר, במקרה זה, גם אם ההתפלה תהיה במלוא הקיבולת, היא לא תספק את כל כמות המים הרצויה. בשורה 5, לעומת זאת, מוצג התכנון כפוף לאילוף שאף פעם לא יהיה מחסור (והמחיר מכסה עלות). לצורך התוכנית הזו ייבנה

מפעל בקיבולת של 491 מ"ק לשנה ומחיר המים יהיה אז 4.38 ש"ח למ"ק. סגירת המחסור נעשית בפעולת מספריים: מצד אחד מפעל התפלה גדול יחסית ומצד שני מחיר גבוה שמצמצם את הביקוש.

משטר המחירים בשורה 6 שונה מקודמיו. כאן המחיר ישתנה בהתאם למימוש האירועים. בשנת בצורת חריפה, אירוע א, המחיר יהיה 7 ש"ח למ"ק; באירועים ב, ג הוא יהיה 1 ש"ח למ"ק; ובהתממש אירוע ד לא תהיה משמעות למחיר. כדאי להשוות לאיור 1 ולראות שבשורה 6 החקלאים ייקחו בכל תקופה את כמות המים שמתאימה לאירוע שיתרחש; אין צורך בהקצאה מנהלית. למשטר המחירים של שורה 6 יש עוד שני יתרונות, האחד הוא שבמשטר זה ההכנסה הנקייה בשיאה, כמו בשורות 2, 3. היתרון השני הוא שבגביית המחירים של שורה 6 הפדיון יכסה במדויק את כל העלות, קבועה פלוס משתנה. נראה כאילו משטר המחירים המשתנים הוא העדיף: הקצאה במחירים, הכנסה בשיאה, והעלויות מכוסות. הקושי הוא ביישום. כאן, בדוגמה השרירותית, אנו מחשבים את המחיר, לכל אירוע, בו החקלאים ייקחו בדיוק את כמות המים המתאימה. במציאות קשה מאד, אולי אף בלתי אפשרי, לדעת מה המחיר שיכתוב שימוש אופטימלי במים בכל אירוע, ובמציאות צפויים אירועים רבים. בנוסף לכך, אימוץ המחירים המשתנים פירושו שדווקא בשנות בצורת חריפה יעלו המחירים—גם יהיו פחות מים וגם מחירים גבוהים. החקלאים עלולים למרוד.

#### דין

כפי שהסברנו, להקצאה במחירים יש יתרונות לעומת הקצאה מנהלית, אולם החקלאים משלמים. בדוגמה של לוח 1 במחיר 1 ש"ח למ"ק יהיה תשלום החקלאים 234 ש"ח לשנה. במחיר שיכסה עלויות (4.04 ש"ח למ"ק) יהיה התשלום 813 ש"ח למ"ק ובמחירים שמשתנים לפי האירוע—התשלום יהיה 881 ש"ח למ"ק. בניסוח שלנו, הכנסת משק המים היא סכום ההכנסות של החקלאים, הספקים והמשק הלאומי. בהסתכלות זו, תשלום החקלאים הוא העברה בתוך המשק; כביכול, מכיס לכיס. סביר שהחקלאים לא רואים זאת כך והם יעדיפו הקצאת מים בחינם. אולם ייתכן גם שחקלאים שייקלו בקשיים של ההקצאה המנהלית—למשל, חוסר היכולת להרחיב שטחי שלחין—יעדיפו לשלם ובלבד שלא תהיינה מגבלות על הכמויות שייקחו. הניתוח הכלכלי מצביע על המשמעות של הבחירה במשטר מחירים זה או אחר. הבחירה עצמה אינה עניין טכני, אינה נפתרת בהקשה על לוח המחשב, וההחלטה עליה היא החלטה של מדיניות חברתית-פוליטית.

כפי שראינו כאן ובמקומות אחרים, תמחור שולי—מחיר זהה לעלות השולית—מביא להקצאה מיטבית. אולם בהיקבע מחיר כזה, תהיינה תקופות מחסור לא מעטות; בלוח 1 שנה אחת מכל ארבע. ריבוי תקופות מחסור בתמחור שולי עורר ביקורת חריפה כאשר ניתוח דומה לשלנו הוצג לראשונה בספרות הכלכלית לפני כארבעים שנים. הביקורת היתה שבתמחור שולי, בדרך כלל נמוך יחסית, הכמות המבוקשת של השירות (חשמל, גז, מים) תהיה רבה ובהכרח תהיינה גם תקופות מחסור ניכרות. בתקופות אלו לא מסופקת כל הכמות המבוקשת ועלולים להיגרם נזקים חמורים; כאלה שניתוח רגיל מתעלם מהם. בתגובה לביקורת הושקעו מאמצים רבים באמידה של נזקי צמצום ההספקה, אך הדבר אינו פשוט. על כן במקרים רבים המתכננים מוותרים על שילוב מפורש של נזקי הפסקת ההספקה בניתוח ומחליטים באופן שרירותי, או מוטב לומר בשיפוט מקצועי, על דרגת אמינות נדרשת; למשל, שלא יהיה צמצום בהספקת המים לחקלאות אלא אחת לעשר שנים. גם כאן, ההחלטה אינה כלכלית טכנית אלא מדינית ציבורית. לנו נראה שהכרת היסודות העקרוניים של התכנון והתמחור בעולם בו קיימת אקראיות מסייעת לשיפוט המקצועי ולשיקול הציבורי אפילו, ואולי דווקא, במקרים בהם משולבות הכרעות שאי-אפשר להצדיקן הצדקה מלאה בחישוב מתמטי מפורש.

מראי מקום

גולדפרב, אור ויואב כסלו, 2007, "ביקוש שיא ואמינות ההספקה", הנדסת מים, גיליון 53, ע' 10-14.

כסלו, יואב, 2002, "הרצאה, מחירי המים בעידן ההתפלה",

<http://departments.agri.huji.ac.il/economics/yoav-home.html>

Tsur, Yacov, 1990, "The Stabilization Role of Ground Water When Surface Water Supplies Are Uncertain: The Implication for Groundwater Development," Water Resources Research, 28 (5): 811-818.